

## 論文の内容の要旨

氏名：相 田 康 洋

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：津波漂流物と構造物の衝突問題への MPS 法の応用に関する基礎的研究

2011年3月11日に発生した東日本大震災は東北地方太平洋沿岸の都市に壊滅的被害を与えた。警察庁によると東日本大震災による被害状況は、2012年12月26日時点で、死者・行方不明者合わせて1万8591名、建築物被害としては全半壊合わせて39万7390戸におよぶ。特に建築物の被害状況から地震ではなく津波による被害であることが明らかにされている。地盤に固定されていない沿岸域の物体は、津波の来襲により漂流物となり、建築物や構造物へ衝突した。東日本大震災で津波漂流物となった物体は、港湾に設置されたコンテナ、船舶、車、ケーソン等であり、質量が大きいものでは特に船舶が挙げられる。大質量の漂流物の構造物への衝突はその構造的な破壊を招き、その対策を講じるためには津波漂流物の衝突力を予測する必要がある。津波漂流物の衝突力を予測するために採られる有力な手法に数値シミュレーションがある。沿岸域の津波現象に数値シミュレーションを利用した研究は数多く存在するが、その中で津波漂流物の衝突を取り扱ったものは限られる。これを難しくしている原因は、数値シミュレーションに非線形非圧縮性流れ場を解ける手法であること、浮体の取り扱いができる手法であること、衝突力の取り扱いができる手法であることの三点が要求されることにある。また、沿岸域の津波現象は砕波、越波、越流を伴い自由表面の大変形が発生し、これらの現象を合理的に解ける手法が沿岸域の津波シミュレーションおよび津波漂流物の衝突シミュレーションに要求される。MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は越塚らによって1995年に開発された非圧縮性流体のための粒子法であり、自由表面の大変形の際にも格子法のような煩雑な格子生成の作業を行わずに統一的に流れ場を扱うことができる数値シミュレーション手法である。また MPS 法の浮体のモデル化では、浮体-流体間に特別な境界条件を設定せずに波浪場中浮体運動が解ける手法が提案されており、津波漂流物を浮体として取り扱うことで、津波漂流物の構造物への衝突現象を解く際にも数値シミュレーション手法として有力であると考えられる。しかしながら、津波漂流物の構造物への衝突に MPS 法を適用した研究は例が少なく、合理的にその衝突力を再現可能にした研究は筆者の知る限りない。そして津波漂流物の発生から構造物への衝突までの一連の現象を統一的に解くことを可能にした研究も同様に例がない。

そこで本研究の目的を、津波漂流物の構造物への衝突をシミュレーション可能な MPS 法による数値シミュレーション手法を開発し、応用として本手法を導入したシミュレーションシステムにより津波漂流物の発生から構造物への衝突までの一連の現象を統一的に解くことが可能であることを示すことと設定した。

本論文は序論結論を含めて6章で構成されている。

2章では本シミュレーションシステムを開発するにあたり必要な技術要素を示しまとめた。また、既存の研究で行われていた剛体でモデル化された浮体と壁粒子間での衝突力を壁粒子の圧力の面積分として求める場合の問題点を数値実験により明らかにし、その原因となる問題を考察し特定した。特徴と問題をまとめると、①剛体が壁境界に衝突する場合その挙動は弾性的な挙動をする、②その際の最大衝突力と衝突現象の開始から終了までの時間はシミュレーション時間刻みに依存する、③衝突面積によって衝突力が変化する、④角の衝突では数値実験を行った全てのケースで浮体モデルが壁をすり抜ける現象が確認された、以上である。最大衝突力と衝突の開始から終了までの時間がシミュレーション時間刻みに依存する問題では、剛体-壁間の剛性やヤング係数に相当する物理量がシミュレーション時間刻みに依存するという根本的な問題であり、剛体でモデル化された浮体による衝突力は、それら物理量を定めてシミュレーションを行うことが実質不可能であることを示していた。また、船首のような粒子によって鋭角にモデル化される部分の衝突現象では、シミュレーション時間刻みを細かくしたとしても浮体が壁境界をすり抜ける現象を防ぐことができないことが示された。それら問題点を解決するために、津波漂流物に作用する仮想弾性境界の提案を行った。本論文で提案した仮想弾性境界は浮体構造物のみに作用するものであり、直接流体には作用しないが、浮体に作用する流体力とは連成を行う境界である。仮想弾性境界によって浮体に強

制力を与え、同時刻ステップに浮体を構成する全ての粒子に同時に作用させることで修正移動量、修正速度を計算する。仮想弾性境界によって浮体に作用する強制力は浮体を構成する粒子と仮想弾性境界の位置ベクトル差を変数とする関数として任意に与えることが可能である。浮体の仮想弾性境界への衝突力は浮体の流体力を考慮しない衝突力と衝突時の浮体に作用する流体力を連成したものとなり、衝突力は浮体を構成する粒子と境界の位置ベクトル差として出力される。この位置ベクトル差を設定した関数と照らし合わせることで間接的に仮想弾性境界に作用する浮体の衝突力を求めることができる。本手法の利点は上記した壁 - 剛体モデル間で衝突問題を扱った際に発生するほぼ全ての問題を解決できる点にある。

3章では2章で提案された理論をもとに開発された MPS 法のシミュレーションシステムの基本的な現象への適用の確認を行った。ダム崩壊問題による水柱崩壊先端位置の比較では従来の MPS 法と同様の結果を得られており、実験値とも良い一致が示された。静水圧問題では圧力値の解析解と良好な一致を確認し、長時間のシミュレーションでも圧力が不安定になることなく安定したシミュレーションが行えることが示された。津波波形の再現の確認では、従来の MPS 法で問題となっていた長距離伝搬時の波形の再現精度が長波において向上したことを確認し、実験値と定量的に一致する結果を得た。複数種類の粒子で構成された浮体モデルの喫水に関する検証では、解析解とほぼ完全な一致を確認した。仮想弾性境界への浮体の衝突に関する検証では、精度がシミュレーション時間刻みに依存するものの、その衝突力と衝突開始から終了までの時間の両方が実験値および理論値と一致することを確認した。従来の剛体でモデル化された浮体と壁粒子間での衝突で問題となっていた、壁を浮体がすり抜ける現象に対しては、衝突時に回転運動が発生しない衝突角度において、浮体の衝突面の粒子が1粒子であっても仮想弾性境界は衝突力を計測できることを確認した。また、衝突力の精度がシミュレーション時間刻みに依存することを確認したが、シミュレーション時間刻みを細かくすることで理論値に収束することを確認した。衝突力の精度の考察では、衝突現象の開始から終了までの時間をシミュレーション時間刻みで無次元化した無次元衝突時間で評価する手法を提案し、目安となる無次元衝突時間を明らかにした。

4章では浮体が構造物に衝突した際に浮体に作用する衝撃津波波圧を MPS 法で再現可能であるかを確認するため、壁構造物に作用する衝撃津波波圧の数値実験および水槽実験を行った。実験とシミュレーション結果を比較するとシミュレーション値の圧力が低くなる傾向が確認された。圧力が低く計測される理由として MPS 法では壁境界を粒子で構成していることが考えられる。壁境界を粒子で構成した場合その表面は凹凸している。流体はこの凹凸により構造物から早く剥離したものと考えられる。しかしながら衝撃津波波形の一波目と二波目のピークを再現できており一定の妥当性と適用性が示された。

5章ではより応用的な例として海域に設置された浮体が津波により岸壁へ乗り揚げり、陸上構造物に衝突するまでの一連の現象を実験とシミュレーションで再現した。シミュレーションでは浮体を粒子でモデル化する際に、外板とバラストを粒子で構成した後、内部に非常に軽い粒子を充填することで中空の浮体モデルであっても外板粒子の自由表面誤判定を防ぐことができる手法を採用した。津波による岸壁への乗り揚げり挙動では水平挙動、鉛直挙動、回転挙動を実験と比較し定量的に精度よく再現できることを示し、その後の漂流から構造物の衝突までの挙動も精度よく再現できることを示した。また、最大衝突力は実験値の9割程度をシミュレーションで再現可能であり、衝突開始から終了までの時間も実験値と定量的に一致することが示された。最大衝突力が MPS 法において低い原因はその衝突速度にあり、衝突直前の水平挙動の微小な差によって発生している。遡上後の津波流れ場の速度は実験と良い一致を示してはいるものの、岸壁を粒子で再現する際の凹凸による底面摩擦が漂流速度の低下を招いたと考えられる。以上より開発したシミュレーションシステムは海域にある船舶等の大質量の津波漂流物の発生から陸域へ乗り揚げり構造物へ衝突するまでの一連の現象を再現、評価可能であることを示した。

以上から、本研究では津波漂流物の構造物への衝突をシミュレーション可能な手法を開発し、各種検証計算と水槽実験を通じその手法とシミュレーションシステムの妥当性を確認し、応用として津波漂流物の発生から構造物への衝突までの一連の現象を統一的に解くことが可能であると示された。これらの成果は今後沿岸域の防災に寄与すると考える。